

太赫兹宽带 Denisov 型准光模式变换器的设计分析

边慧琦^{1,2}, 杜朝海^{2*}, 潘石², 刘濮鲲^{2*}

(1. 北京无线电测量研究所, 北京 100854;

2. 北京大学 电子学系 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 北京 100871)

摘要: 研究并设计了一种具有宽频带工作能力的大赫兹准光模式变换器。该准光模式变换器采用具有高效率特性的 Denisov 辐射器, 工作在 $TE_{6,2}$ 模式, 用于实现回旋管内的模式变换。由于 Denisov 辐射器的参数是影响准光模式变换器宽带性能的主要因素, 因此通过对辐射器参数的优化设计, 达到增大模式变换器带宽的效果。使用自主开发的准光学模拟程序进行仿真, 模式变换器中心频率为 94 GHz, 带宽达 2 GHz。

关键词: 太赫兹; 准光; 模式变换; 宽带

中图分类号: TN12; O441.4

文献标识码: A

Design and analysis of a broadband quasi-optical mode converter with a Denisov launcher

BIAN Hui-Qi^{1,2}, DU Chao-Hai^{2*}, PAN Shi², LIU Pu-Kun^{2*}

(1. Beijing Institution of Radio Measurement, Beijing 100854, China;

2. School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: A terahertz quasi-optical mode converter with wide bandwidth was studied and designed. The quasi-optical mode converter used Denisov launcher, which had high efficiency, and worked in $TE_{6,2}$ mode. It was used to realize mode conversion in gyrotron. As the parameters of Denisov launcher were the main factors affecting the broadband performance of quasi-optical mode converter, the optimal design of the radiator parameters could increase the bandwidth of the mode converter. Using the self-developed quasi-optical simulation program for simulation, the bandwidth of the mode converter can reach 2 GHz (center frequency 94 GHz).

Key words: Terahertz, quasi-optics, mode converting, broadband

PACS: 41. 20. Jb, 84. 40. Ba, 84. 60. -h

引言

回旋管作为大功率领域毫米波太赫兹源的首选器件, 在材料加工、电子回旋加热和高分辨率雷达等方面具有优异的性能^[1, 2]。由于回旋管设计的趋势是高功率、高频率, 因此回旋管往往采用高阶工作模式^[3, 4]。准光模式变换器是回旋管的重要组成部分, 用于将回旋管互作用腔输出的高阶模式转

换为高斯光束^[5]。高阶模式更容易受到衍射和偏振损耗的影响, 这对回旋管的输出效率和功率容量产生了严重的负面影响。传统的 Vlasov 辐射器^[6]具有加工简单、频率相对稳定等优点, 因而得到了广泛的应用。但当应用于高阶模式时, Vlasov 辐射器前端的表面电流相当强, 造成边缘衍射损耗, 导致 10% 以上的能量以热能的形式消散^[7]。为了解决这

收稿日期: 2019-12-16, 修回日期: 2020-07-20

Received date: 2019-12-16, Revised date: 2020-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(61531002); "NSAF" 联合基金(U1830201); 中英人才基金(61861130367); 英国皇家学会牛顿高级学者基金(NAF/R1/180121)。

Foundation items: Sponsored by the National Natural Science Foundation of China under Contracts 61531002, NSAF U1830201 and 61861130367 (Newton Advanced Fellowship from Royal Society United Kingdom NAF/R1/180121).

作者简介(Biography): 边慧琦(1993-), 女, 山西太原人, 硕士研究生, 主要研究领域为太赫兹器件及其应用。Email: bianhuiqi@pku.edu.cn

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: duchaochai@pku.edu.cn; pkliu@pku.edu.cn

一问题,一种具有波纹波导壁的 Denisov 发射装置出现了,它在 Vlasov 辐射器的基础上,在波导内壁增加了周期性微扰^[8],使波导内原本均匀分布的电磁场产生周期性的强弱分布,通过选择在电场分布较弱的地方进行切口,可以降低边缘衍射损耗,提高辐射器的效率^[9]。与使用 Vlasov 辐射器的准光模式变换器相比,使用 Denisov 辐射器的准光模式变换器其转换效率可以达到 99% 以上,比使用 Vlasov 辐射器的转换效率要高 10% 以上。前期关于 Denisov 型准光辐射器的研究主要是应用于单频点或者一系列离散频率工作的回旋振荡器^[3],本论文主要是拓展该类辐射器在宽带连续频率范围内的工作特性。

近几十年来,太赫兹回旋管的频率调谐能力越来越受到先进军事和医学应用的重视,因此,准光模式变换器的宽带性能成为回旋管设计过程中的一个关键因素^[10]。前人的研究已经证明在准光模式变换器中实现宽带工作的可能性^[11-13]。这些研究可以实现单模连续宽带工作(主要是 Vlasov 辐射器型准光模式变换器),或者可以实现多模离散频点工作(主要是 Vlasov 辐射器型和 Denisov 型准光模式变换器)。在准光模式变换器的宽带特性方面,Vlasov 型辐射器与 Denisov 型辐射器相比,因为有着更为简单的实现机理,因而具有先天的更加宽的带宽的优势。对于兆瓦(MW)级高功率回旋管的应用,Vlasov 型模式变换器具有较高的衍射损耗,严重影响系统的辐射效率。因此,Denisov 型准光模式变换器由于具有显著的高效率优势,在 MW 级回旋管中得到了广泛使用。

前期有关宽带 Denisov 型辐射器的研究工作主要集中于实现多个模式对应的离散频点工作^[13,22],而针对单个模式在连续的宽频带内工作的 Denisov 辐射器尚未见报道。本文主要研究 Denisov 准光模式变换器实现单模宽带连续频率工作的关键科学与技术问题,旨在通过分析模式变换器的各个结构参数对宽带性能的影响,为拓展 Denisov 辐射器型准光模式变换器的带宽性能提供一定的参数设计参考。

本文研究 Denisov 辐射器型准光模式变换器的连续宽带工作能力,工作模式选择为 $TE_{6,2}$ 模式,中心频率为 94 GHz。通过对 Denisov 辐射器参数的优化,实现了 93~95 GHz 连续带宽工作,相对带宽达 2%;在工作带宽范围内,模式变换器的效率均达到 89.4% 以上。输出窗处高斯波束的标量模式纯度

均高于 97.4%,矢量模式纯度均高于 90.1%。

1 Denisov 辐射器的设计

所设计的准光模式转换器的基本结构如图 1 所示,由 Denisov 辐射器(编号 1)、单焦抛物面反射镜(编号 2)、双焦抛物面反射镜(编号 3,5)、平面镜(编号 4)和输出窗(编号 6)组成。由于经 Denisov 辐射器辐射出来的波束已经具有较好的高斯分布特性,因此后续所接的反射镜结构不需要太复杂,仅需要由一系列单焦或双焦抛物面镜对波束进行形状的微调即可实现^[15]。

Denisov 辐射器的结构如图 2 所示,采取周期性的微扰结构,使波导内原本均匀分布的电磁场产生周期性的强弱分布,选择在电场分布较弱的地方进行切口,可以降低切口边缘衍射损耗,提高辐射器的效率。其具体工作原理是,波导壁上的周期性微扰结构改变了原本光滑波导的边界条件,从而使得圆波导原本的本征模式发生改变,原来的本征模式耦合到它的其他卫星模式。卫星模式与本征模式的复振幅进行叠加,通过适当地设计辐射器的扰动结构,波导中的功率分布可以呈现周期的类似高斯场的分布。有关 Denisov 辐射器参数的具体推导,可见文献[16]。

波导壁的微扰结构采用螺旋式波纹波导结构,其半径满足

$$R(\phi, z) = r_w + \alpha z + \delta_1(z) \cos[\beta_1 z - l_1 \phi] + \delta_2(z) \cos[\beta_2 z - l_2 \phi], \quad (1)$$

其中 r_w 为未扰波导半径, $\delta(z)$ 为扰动幅度, β 为工作模式与耦合模式纵向传播常数差, l 为角向扰动的周期数, l 为正数时波导结构为右旋,反之为左旋, ϕ 为角向扰动的初始角度,下标 1 和 2 分别代表一级扰动和二级扰动,扰动分别沿波导角向和轴向进行。 α 为引入的一个微小倾角,作用是减小腔体 Q 值及残余电子注的寄生振荡。根据 Denisov 辐射器卫星模式的选取原则,对于 $TE_{6,2}$ 模式,式(1)中的角向扰动周期数 l 和纵向传播常数差 β 为

$$\begin{aligned} l_1 = 1, \beta_1 &= |(\beta_{m+1,n} - \beta_{m-1,n})|/2 && \text{轴向扰动} \\ l_2 = 3, \beta_2 &= |(\beta_{m+3,n-1} - \beta_{m-3,n+1})|/2 && \text{角向扰动} \end{aligned} \quad (2)$$

为了在螺旋波纹波导内壁形成类高斯波束,需要由工作模式耦合出如表 1 所示的卫星模式,并且需要使各模式的功率分布满足表 1 中列出的功率。而要实现以上参数,需要仔细优化扰动幅度 $\delta(z)$,包

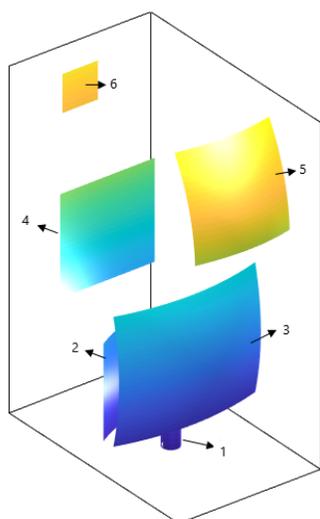


图1 Denisov 辐射器准光模式变换器结构图。1: Denisov 辐射器, 2~5: 镜面系统, 6: 输出窗

Fig. 1 The configuration of the quasi-optical mode converter with a Denisov launcher. 1: Denisov launcher, 2~5: mirror system 6: output window



图2 Denisov 辐射器波纹波导结构

Fig. 2 Dimpled-wall waveguide of Denisov launcher

括其扰动的幅值和扰动的位置。为了分析和优化 Denisov 辐射器内壁的高斯波束, 本文采用耦合模式理论^[17]来计算 Denisov 辐射器内本征模式和卫星模式的电磁场值及功率分布。耦合模式理论的具体公式参见文献^[16]。

表1 形成高斯模式所需的卫星模式及功率分布表

Table 1 Power distribution of satellite modes to form Gaussian beams

		角向耦合		
轴向耦合	TE _{4,3} (3%)	TE _{7,2} (11%)	TE _{10,1} (3%)	
	TE _{3,3} (11%)	TE _{6,2} (44%)	TE _{9,1} (11%)	
	TE _{2,3} (3%)	TE _{5,2} (11%)	TE _{8,1} (3%)	

2 Denisov 型准光模式变换器宽带工作的原理分析

为了拓展 Denisov 辐射器型准光模式变换器在宽带连续频率范围内的工作特性, 需要考虑以下两个方面: (1) 在工作频率发生变化时, 需使模式变换器输出窗处的波束偏移尽可能小; (2) 由于辐射器波纹波导结构是针对某一频点设计的物理结构, 一旦加工成型就不可再改变, 因此在工作频率发生变化时, 应使波纹波导参数的设计值变化尽可能小。

上述两个方面, 即输出窗处的波束偏移和辐射器的波纹波导结构参数, 除了与工作频率有关外, 还取决于辐射器的半径, 因此下面对 Denisov 型准光模式变换器的宽带工作原理分析, 将从工作频率和辐射器半径两个方面进行分析。

2.1 工作频率对宽带性能的影响分析

首先分析工作频率 f 变化对输出窗处波束偏移的影响。由于回旋管中的工作波长比波导的横向尺寸小几十倍, 因此辐射器内部的电磁场的传播, 可以用几何光学理论^[14]来分析。几何光学理论的基本思想是, 将波导内的电磁波看作是一系列几何射线, 将电磁波的传播看作是这些射线像光一样在波导壁上不断反射前进, 射线的方向即为波矢量的方向, 如图3所示。

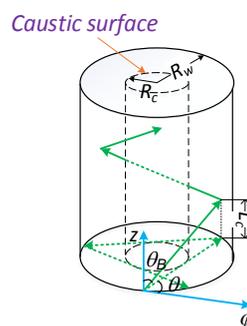


图3 辐射器内射线传播的几何光学模型

Fig. 3 Geometric optics mode of rays in the launcher

由图3可知, 波矢量与波导轴线方向的夹角 θ_B 满足

$$\theta_B = \sin^{-1} \frac{k_t}{k} = \sin^{-1} \frac{\chi'_m c}{r_w 2\pi f}, \quad (3)$$

其中, χ'_{mn} 是第 m 阶贝塞尔函数的导数的第 n 个根, c 为真空中的光速, r_w 为辐射器半径, f 为工作频率。

电磁波波矢量在辐射器中传播的轴向角度 θ_B 将影响电磁波射线从辐射器出射的角度, 并“连锁反应式”地影响电磁波传播到后续一系列镜面上的位置, 最终影响输出窗处的波束位置。

从式(3)可以看出, 轴向角度 θ_B 与 f 频率有关。图4(a)给出了 TE_{6,2} 模式在截止频率以上时, 辐射器半径分别为 $r_{w1} = 6.85 \text{ mm}$, $r_{w2} = 7.05 \text{ mm}$, $r_{w3} = 7.25 \text{ mm}$ 时, 轴向角度 θ_B 和频率 f 的变化关系。可以看出, 随着频率的增大, 轴向夹角 θ_B 变小且变化速率变缓, 这意味着在容忍相同的 θ_B 变化范围时, 频率值较大时的频带更宽。在低的频率范围内, 很小

的频率变化就会引起较大的 θ_B 的变化,这对宽带准光模式变换器来说是十分不利的。

除此之外,由于轴向角度 θ_B 随频率 f 变化,宽带范围内工作的波束其轴向角度 θ_B 有差异,从而宽带波束射到后续镜面上的位置也不同,这会使得后续镜面的长度相比单频点工作时增大。图4(b)给出了波束射到抛物面反射镜2(假定辐射器与抛物面反射镜的横向距离 ΔW 一定, $\Delta W = 30$ mm)时,在固定带宽范围内(3 GHz)最大频率和最小频率的轴向偏移距离差值 ΔL 。可以看出,随着频率的增大,波束在固定带宽内的轴向偏移距离差值减小。轴向偏移差值越小,准光模式变换器内各个反射镜为了容忍宽带工作而所需增加的轴向宽度越小。因此较大的工作频率值可以使得反射镜宽带工作的“代价”较小。

综上所述,当工作频率高于并远离截止频率时,准光模式变换器输出窗处的波束偏移对频率变化的敏感性降低,工作带宽变宽。

接下来,分析工作频率 f 变化对波纹波导结构参数的影响。由于 Denisov 辐射器的螺旋波纹波导结构是根据指定单频点而设计的,而当 Denisov 型准光模式变换器工作在宽频带时,必须解决以下问题:针对单频点设计的螺旋波纹波导结构需要能在连续带宽内正常工作,即在宽带范围内都可以将工作模式转化为可以叠加成高斯分布的混合模式。

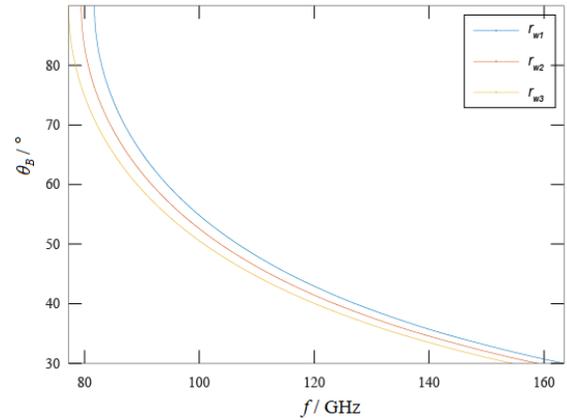
Denisov 辐射器的螺旋波纹波导结构满足式(1),其中 β_1, β_2 满足式(2),而式(2)可进一步写为

$$\beta_1 = \frac{1}{2} |(\beta_{m+1,n} - \beta_{m-1,n})| = \frac{1}{2} \left| \sqrt{\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - \left(\frac{\chi'_{m+1,n}}{r_w}\right)^2} - \sqrt{\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - \left(\frac{\chi'_{m-1,n}}{r_w}\right)^2} \right|$$

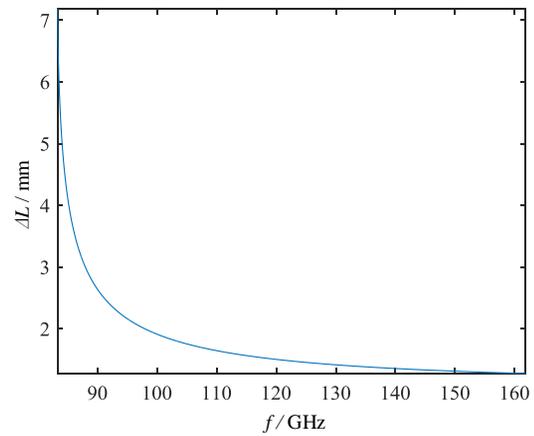
$$\beta_2 = \frac{1}{2} |(\beta_{m+3,n-1} - \beta_{m-3,n+1})| = \frac{1}{2} \left| \sqrt{\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - \left(\frac{\chi'_{m+3,n-1}}{r_w}\right)^2} - \sqrt{\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - \left(\frac{\chi'_{m-3,n+1}}{r_w}\right)^2} \right|$$

(4)

从式(4)可以看出,影响波纹波导结构的参数 β_1, β_2 与工作频率有关。为了分析频率的变化是如何影响 β_1, β_2 的,图5画出了 $TE_{6,2}$ 模式的 β_1, β_2 与工作频率 f 的关系。由于螺旋波纹波导的物理结构是固定不可变的,因此 β_1, β_2 的值一旦确定就不可变化。从图中可以看出,随着频率 f 的增大, β_1, β_2 均逐渐减小且减小的速率变缓。这表明,当选择较大的



(a)



(b)

图4 (a) Denisov 辐射器轴向角度 θ_B 与频率 f 的变化关系 (b) Denisov 辐射器出射的宽带波束在抛物面反射镜2上的轴向偏移差 ΔL 与频率 f 的变化关系

Fig. 4 (a) Variation of axial reflective angle θ_B to frequency f in Denisov launcher (b) Axial deviation ΔL of the broadband beam emitted by Denisov launcher on parabolic mirror 2 to frequency f in Denisov launcher

频率时,相比与频率较小的情况,相同的 β_1, β_2 变化范围可以容纳更宽的频率变化范围。

因此,远离截止频率且较大的工作频率可以使固定的螺旋波纹波导的物理结构在更宽的频率范围进行有效地工作。

但工作频率也不是越高越好。当频率非常高时, θ_B 会变得很小,这意味着射线几乎是平行着传播方向 z 轴出射的,这会使得布里渊区在轴向的长度变得很长,从而辐射器的切口和后接的反射镜轴向长度也很长,同时反射镜之间的间距很大,整个

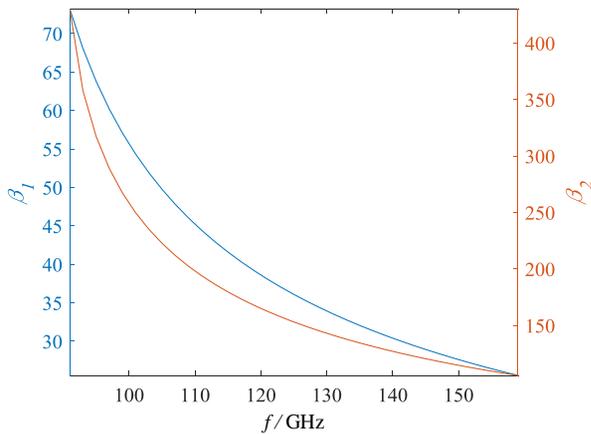


图5 Denisov 辐射器螺旋波纹波导结构参数 β 与频率 f 的变化关系

Fig. 5 Variation of structural parameter β of spiral corrugated waveguide in Denisov launcher to frequency f

模式变换器系统会变得十分冗长。并且,当频率增大时,不仅仅是工作模式的 θ_B 减小,耦合模式的 θ_B 也会减小,这会使得工作模式和耦合模式从同一点出发的射线,在纵向上到达波导壁时相距很远,不能很好地叠加,这直接违背了Denisov辐射器螺旋波纹波导结构推导的前提条件,即耦合模式和工作模式叠加产生高斯场分布。这一分析在实际仿真优化过程中也得到了验证,当工作频率或辐射器半径的选择使得轴向夹角 θ_B 较小时,Denisov辐射器较难在波导壁内产生良好的高斯场分布。

综上,当工作频率远离截止频率且合理地增大时,Denisov辐射器型准光模式变换器的带宽会增大。本文根据实际回旋管的研制需求,选择的中心工作频率为94 GHz,因此为了使工作频率远离截止频率,辐射器的波导半径必须经过设计选取以达到改变截止频率的目的。通过在回旋管相互作用段末端与准光模式变换器辐射器的相连处设计半径过渡波导,可以达到改变辐射器半径的目的。

2.2 辐射器半径对宽带性能的影响分析

首先分析辐射器半径 r_w 变化对输出窗处波束偏移的影响。从式(3)可以看出,电磁波波矢量从辐射器出射的轴向夹角 θ_B 与辐射器的半径 r_w 有关。图6画出了TE_{6,2}模式轴向夹角 θ_B 及辐射器切口长度与辐射器半径 r_w 的变化关系。在式(3)中, r_w 影响着轴向夹角 θ_B 的大小,进而影响着输出窗处波束的位置。从图6可以看出,当辐射器半径 r_w 增加时,轴向夹角 θ_B 减小并且减小的速率变缓。这意味着较大的 r_w 使得 θ_B 较小,从而降低了模式变换器的频率敏

感性。较大的 r_w 意味着较低的截止频率,从而使已经确定的94 GHz工作频率得以远离截止频率,根据2.1节的结论,这样可以增大准光模式变换器的工作带宽。

r_w 不能选得过大,这是因为 r_w 过大会使得轴向夹角 θ_B 很小,如2.1节所述, θ_B 很小时会存在模式变换器结构过长及耦合模式难以与工作模式高效耦合的问题。

因此,选择适当大的辐射器半径可以降低波导的截止频率,从而使工作频率远离截止频率,降低准光模式变换器输出窗处的波束偏移对频率变化的敏感性,增大工作带宽。

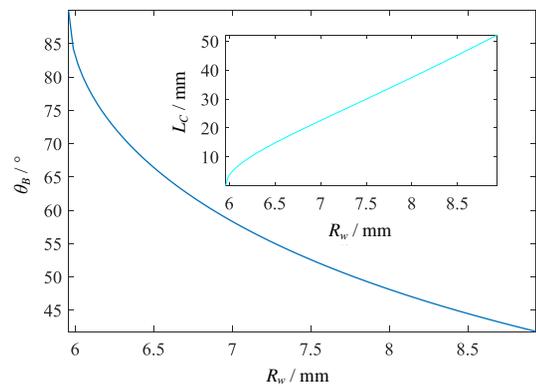


图6 轴向夹角 θ_B 及辐射器切口长度 L_C 与辐射器半径 r_w 的变化关系

Fig. 6 Variation of axial reflective angle θ_B and cutlength L_C to the radius of Denisov launcher r_w

接下来分析辐射器半径 r_w 对螺旋波纹波导结构中参数的影响。图7给出了螺旋波纹波导结构参数 β_1 、 β_2 与频率 f 在不同辐射器半径 r_w 下的变化关系。其中蓝色曲线代表 β_1 ,橙色曲线代表 β_2 。 r_{w1} 、 r_{w2} 和 r_{w3} 代表不同的辐射器半径且 $r_{w1} = 6.85$ mm, $r_{w2} = 7.05$ mm, $r_{w3} = 7.25$ mm, 满足 $r_{w1} < r_{w2} < r_{w3}$ 。从图中可以看出,当辐射器半径 r_w 增大时, β_1 、 β_2 对频率变化的敏感性有所降低。也就是说,选择较大的辐射器半径可以使Denisov型准光模式变换器工作在更宽的频带范围。

因此,选择较大的辐射器半径可以使固定的螺旋波纹波导的物理结构在更宽的频率范围进行有效地工作。

综合考虑以上关于工作频率和辐射器半径的分析,在选定中心工作频率为94 GHz的情况下,选择较大的辐射器半径以使辐射器的截止频率较低,

从而达到使工作频率远离截止频率的目的。假设圆波导截止频率为 94 GHz 时对应的圆波导半径为 r_0 , 根据圆波导内 TE 模截止频率公式 $f = \chi'_m / 2\pi r_0 \sqrt{\mu\epsilon}$, 可计算得到 $r_0 = 5.96 \text{ mm}$ 。选取 $r_w = 1.15r_0$ 作为辐射器半径, 以使工作频率 94 GHz 远离对应的截止频率, 同时该半径值不至于使轴向角度 θ_B 过小, 因此最终选取 $r_w = 6.85 \text{ mm}$ 。所选取的 r_w 使得频率变化对输出窗处波束偏移和波纹波导结构参数的影响尽可能降低。

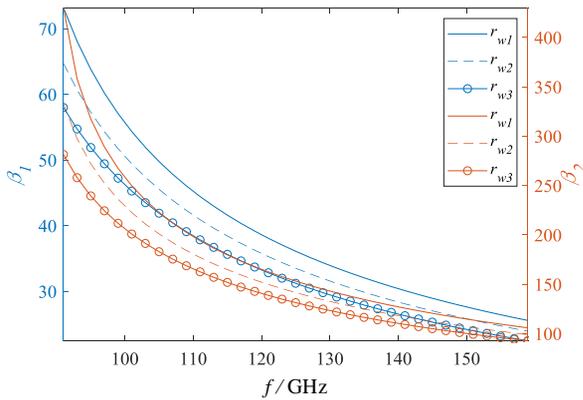


图7 螺旋波纹波导结构参数 β 与频率 f 在不同辐射器半径 r_w 下的变化关系

Fig. 7 Variation of structural parameter β of spiral corrugated waveguide in Denisov launcher to frequency f in different radii of Denisov launcher r_w

3 宽带 Denisov 辐射器型准光模式变换器的设计与结果分析

3.1 准光模式变换器的具体设计

根据 Denisov 辐射器的波纹波导微扰结构和耦合模式理论, 并结合矢量衍射积分公式^[19]编写了 Denisov 辐射器型准光模式变换器的模拟计算程序, 该程序的正确性已在此前的文献中得到了验证^[12, 21]。利用该程序, 并根据扰动幅度和扰动长度的表达式^[18]得到的结果作为优化初始值, 将表 1 中各模式的功率分布作为目标进行迭代优化, 得到两级扰动幅度的大小分别为 $\delta_1 = 0.08 \text{ mm}$, $\delta_2 = 0.09 \text{ mm}$, 如图 8 所示。

利用耦合模式理论, 可以计算 Denisov 辐射器内壁的电场分布。图 9 给出了计算得到的 TE_{6,2} 模式在中心频率 94 GHz 处 Denisov 辐射器侧壁展开图上的电场分布。可以看出, 波束在轴向和角向上形成了良好的聚束效果, 随着波束从一个布里渊区移动到

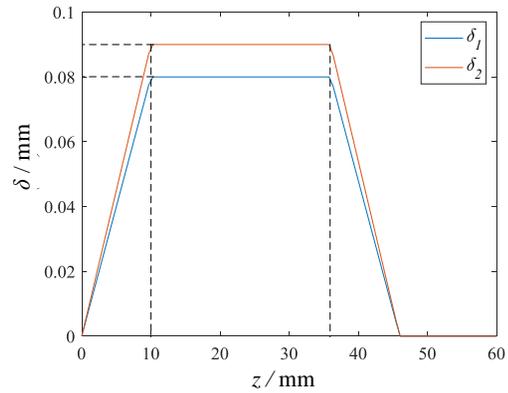


图8 TE_{6,2}模式 Denisov 辐射器扰动幅度

Fig. 8 The The disturbance amplitude of Denisov launcher in TE_{6,2} mode

下一个布里渊区内, 波束的聚束效果越来越明显。在优化 Denisov 辐射器的扰动幅度和扰动长度等参数时, 一是要使布里渊区内的波束形状接近高斯分布, 二是要使布里渊区边缘的场尽可能的弱, 只有这样, 才能使布里渊区边缘的辐射器切口造成的衍射损耗尽可能地降低。从图 9(a) 可以看出, 在如图中白色折线段的地方设置切口, 可以使切口切割到的壁电流最小。

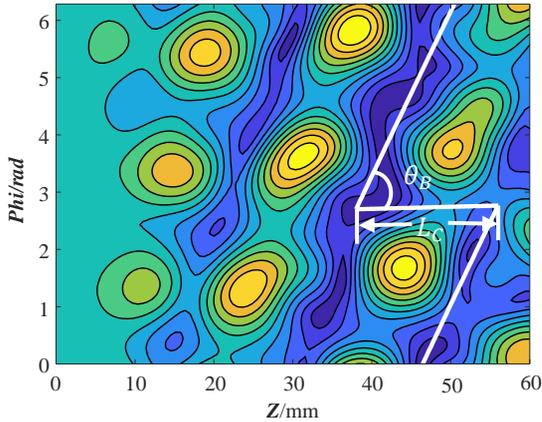
利用矢量衍射积分公式^[19]可以计算准光模式变换器镜面上的电磁场分布, 各镜面均为标准单焦抛物面或双焦抛物面, 具体参数见表 2。根据程序计算得到的辐射波束的方向和横向大小, 决定各级抛物面反射镜的位置和面积大小。再根据计算得到的输出窗处波束的形状和高斯纯度, 再反过来对各级抛物面镜的焦距等参数进行微调, 直到输出窗处波束的高斯纯度达到要求。

图 10 给出了 TE_{6,2} 模式中心频率 94 GHz 宽带准光模式变换器的整体仿真图。可以看出, 波束在从辐射器辐射到后接反射镜时已经形成了初步的聚束效果, 因此后续的反射镜面即使采用较小的面积也可以接收到前级反射镜几乎全部的辐射能量, 这也是 Denisov 型辐射器效率高的原因。

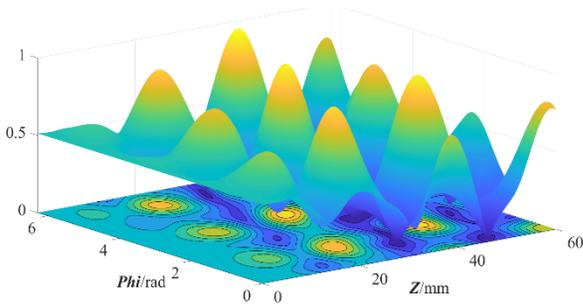
3.2 准光模式变换器宽带性能分析

利用上节的程序, 在保持准光模式变换器结构不变的情况下, 在中心频率两侧拓展计算的频带范围, 最终可得, 在 93~95 GHz 频率范围内, 该模式变换器均能将波束进行有效的模式转换并最终从输出窗输出。

为了保证宽带 Denisov 型准光模式变换器能够将所有频率的场有效地辐射出去, 图 9 中辐射器的



(a)



(b)

图9 (a)TE_{6,2}模式在中心频率94 GHz处 Denisov 辐射器侧壁展开电场分布 (b)TE_{6,2}模式在中心频率94 GHz处 Denisov 辐射器侧壁展开三维电场强度分布

Fig. 9 (a) The field distribution of Denisov launcher on the unrolled waveguide wall at 94 GHz in TE_{6,2} mode. The white line represents the cutting position (b) The 3D field distribution of Denisov launcher on the unrolled waveguide wall at 94 GHz in TE_{6,2} mode.

切口长度 L_C 要选取所有工作频率中布里渊区最长的长度,切口角度 θ_B 要选择所有工作频率中布里渊

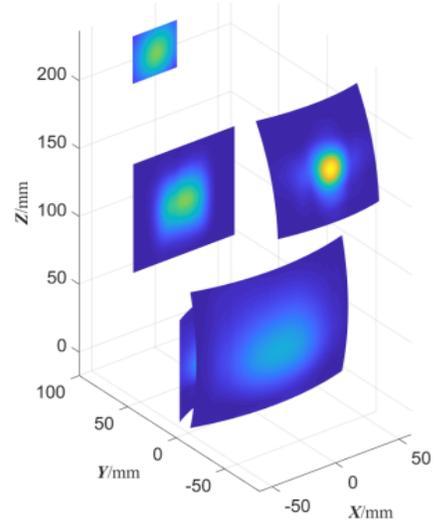


图10 TE_{6,2}模式94 GHz宽带准光模式变换器整体仿真图
Fig. 10 The whole field distribution on quasi-optical mode converter at 94 GHz in TE_{6,2} mode.

角最大的角度。从图4可以看出,布里渊角 θ_B 随频率 f 的增大而减小,因此选择93 GHz处的 $\theta_B = 61.5^\circ$;从图6可以看出,切口长度 L_C 随频率 f 的增大而增大,因此选择95 GHz处的 $L_C = 21.2$ mm。

定义标量高斯纯度和矢量高斯纯度分别如式(5)、(6)所示^[20],

$$\eta_s = \frac{\int_s |E_1| \cdot |E_0| dS}{\sqrt{\int_s |E_1|^2 dS \cdot \int_s |E_0|^2 dS}}, \quad (5)$$

$$\eta_v = \frac{\int_s |E_1| \cdot |E_0| e^{j(\phi_1 - \phi_0)} dS \cdot \int_s |E_1| \cdot |E_0| e^{j(\phi_0 - \phi_1)} dS}{\int_s |E_1|^2 dS \cdot \int_s |E_0|^2 dS}, \quad (6)$$

其中, E_1 、 E_0 分别为目标波束的横向电场和标准高斯基模的横向电场幅度, ϕ_1 、 ϕ_0 分别为二者的相位分布。标量模式纯度用来衡量波束的场幅度与目标高斯波束的相似程度,矢量模式纯度用来衡量波

表2 准光模式变换器各部分参数表

Table 2 Parameters of each part of quasi-optical mode converter

镜面	Denisov 辐射器 1 中心(0, 0, 0)	抛物面反射镜 2 中心 (4.0, 30.0, 20.0)	抛物面反射镜 3 中心 (0, - 30.0, 46.5)	平面镜 4 中心 (0, 70.0, 105.0)	抛物面反射镜 5 中心 (0, 80.0, 200.0)	输出窗 6 中心 (0, - 100.0, 200.0)
参数	半径 $r_w = 6.85$ mm	抛物线参数 $1/F_1 = 40$ mm $1/F_2 = \infty$	抛物线参数 $1/F_1 = 100$ mm $1/F_2 = 100$ mm	宽度 $\Delta X = 80$ mm $\Delta Z = 80$ mm	旋转角度 $\Delta\varphi = 16.5^\circ$ 宽度 $\Delta X = 80$ mm $\Delta Z = 80$ mm	半径 $\Phi = 40$ mm
	切口长度 $L_c = 21.2$ mm	宽度 $\Delta X = 100$ mm $\Delta Z = 75$ mm	宽度 $\Delta X = 120$ mm $\Delta Z = 100$ mm	效率 99.3%	效率 99.5%	
		效率 97.0%	效率 97.5%			

束的场(包括幅度和相位)与目标高斯波束的相似程度。

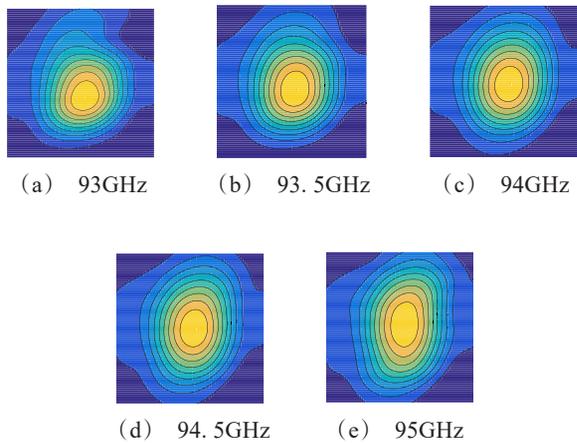


图 11 $TE_{6,2}$ 模式宽带准光模式变换器在 93~95 GHz 输出窗场分布

Fig. 11 The field distribution on the output window at different frequency points from 93~95 GHz in $TE_{6,2}$ mode.

图 11 计算得出了宽带准光模式变换器在不同工作频率下输出窗的场分布。可以看出,在 93~95 GHz 的工作频率范围内,该模式变换器均能将波束进行有效的模式转换并最终从输出窗输出。

表 3 输出窗处高斯波束 93~95 GHz 的标量模式纯度、矢量模式纯度和模式转换效率

Table 3 Scalar mode purity, vector mode purity and mode converting efficiency of Gaussian beam on output window at 93~95 GHz

频率 f / GHz	93	93.5	94	94.5	95
标量模式纯度 η_s / %	97.5	99.0	99.2	98.6	97.4
矢量模式纯度 η_v / %	96.4	97.6	96.3	92.9	90.1
模式转换效率 η / %	91.2	91.1	92.0	91.8	89.4

通过计算可得 $TE_{6,2}$ 模式宽带准光模式变换器在 93~95 GHz 各个频率下输出窗处高斯波束的标量模式纯度、矢量模式纯度和模式转换效率如表 3 所示。可见,各个频率下输出窗处的标量高斯纯度均在 97.4% 以上,矢量高斯纯度均在 90.1% 以上,整体输出效率均高于 89.4%。

3 结论

分析了具有 Denisov 辐射器的准光模式转换器的宽带特性,具体研究了 Denisov 辐射器半径和频率变化对准光模式变换器内波束偏移和辐射器波纹

波导结构参数的影响。结论是,对于 Denisov 辐射器,当工作频率远离截止频率且合理增大时,选择相对较大的半径和可以确保不同频率的预聚束波束完全辐射的切口长度,可以扩大天线系统的带宽。仿真结果表明,该模式转换器可以在 $TE_{6,2}$ 模式 93~95 GHz 的连续带宽内高效工作,效率不低于 89.4%,标量模式纯度均高于 97.4%,矢量模式纯度均高于 90.1%。此类宽带 Denisov 型准光模式变换天线可以适用于各种功率等级的回旋管,但目前中小功率回旋管对带宽要求更为迫切。本研究提供了一种高效宽带的模式转换工具,在动态核极化增强磁共振(DNP-NMR)、电子顺磁共振(ESR)等领域都具有重大实际意义。

References

- [1] Petelin M I. One century of cyclotron radiation [J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1999, **27**(2): 294-302.
- [2] Kartikeyan M, Borie E, Drumm O, et al. Design of a 42-GHz 200-kW gyrotron operating at the second harmonic [J]. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 2004, **52**(2): 686-92.
- [3] Thumm M K. Recent developments on high-power gyrotrons—Introduction to this special issue [J]. *J Infrared Millim Terahertz Waves*, 2011, **32**(3): 241-52.
- [4] Pan S, Du C-H, Qi X-B, et al. Broadband terahertz-power extracting by using electron cyclotron maser [J]. *Sci Rep*, 2017, **7**(1): 7265.
- [5] Wang Wen-Xiang. Microwave Engineering Technology [M]. National Defense Industry Press, 2009(王文祥.微波工程技术). 国防工业出版社, 2009.
- [6] Vlasov S N, Orlova I. Quasioptical transformer which transforms the waves in a waveguide having a circular cross section into a highly directional wave beam [J]. *Radiophys Quant Electron*, 1974, **17**(1): 115-9.
- [7] J E C. Gyrotron oscillators—Their principles and practice [J]. *Edgcombe, Ed Lon-don, UK: Taylor & Francis*, 1993.
- [8] Denisov G, Kuftin A, Malygin V, et al. 110 GHz gyrotron with a built-in high-efficiency converter [J]. *Int J Electron*, 1992, **72**(5-6): 1079-91.
- [9] Sabchevski S, Zhelyazkov I, Benova E, et al. Quasi-optical converters for high-power gyrotrons: A brief review of physical models, numerical methods and computer codes [M]. 2006.
- [10] Idehara T, Sabchevski S P. Development and applications of high-Frequency gyrotrons in FIR FU covering the sub-THz to THz range [J]. *J Infrared Millim Terahertz Waves*, 2012, **33**(7): 667-94.
- [11] Samartsev A, Avramidis K A, Gantenbein G, et al. Efficient Frequency Step-Tunable Megawatt-Class S-Band Gyrotron [J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 2015, **62**(7): 2327-32.
- [12] Du C-H, Qi X-B, Liu P-K. Theoretical study of a broadband quasi-optical mode converter for pulse gyrotron de-

- vices [J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2016, **44** (10): 2348–55.
- [13] Prinz O, Arnold A, Gantenbein G, *et al.* Highly efficient quasi-optical mode converter for a multifrequency high-power gyrotron [J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 2009, **56**(5): 828–34.
- [14] Jin J, Thumm M, Piosczyk B, *et al.* Theoretical investigation of an advanced launcher for a 2-MW 170-GHz TE/sub 34, 19/coaxial cavity gyrotron [J]. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 2006, **54**(3): 1139–45.
- [15] Wang Hu. Study of Key Techniques on Quasi-optical Mode Conversion of High Power Millimeter Wave Gyrotron Oscillators [D]. (王虎. 高功率毫米波回旋振荡管准光模式变换关键技术的研究, 2014.
- [16] Jin J. Quasi-optical mode converter for a coaxial cavity gyrotron [M]. Citeseer, 2007.
- [17] Doane J L. Propagation and mode coupling in corrugated and smooth-wall circular waveguides [J]. *Infrared and millimeter waves*, 1985, **13**(123–70).
- [18] Zhang Tian- Zhong. Study of a Quasi Optical Mode Converter for Tereahertz Cyrotron [D]. University of Electronic Science and Technology of China, (张天钟. 太赫兹回旋管准光模式变换器的研究; 电子科技大学, 2015.
- [19] Kong J A. Electromagnetic wave theory [M]. John Wiley & Sons, 1986.
- [20] Qi X-B, Du C-H, Pan S, *et al.* Terahertz broadband-tunable minigyrotron with a pulse magnet [J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 2017, **64**(2): 527–35.
- [21] Wang Hu, Shen Wen- Yuan, Geng Zhi- Hui, *et al.* Study on a High Efficient Denisov-type Launcher for High-power Gyrotron Oscillators [J]. *Acta Physica Siniica*, (王虎, 沈文渊, 耿志辉, 等. 高功率回旋振荡管 Denisov 型辐射器的研究. *物理学报*), 2013, **62**(23): 406–414.
- [22] Li G, Jin J, Tomasz R, *et al.* Analysis of a quasi-optical launcher toward a step-tunable 2-MW coaxial-cavity gyrotron [J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2010, **38**(6): 1361–1368